

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.001

农田土壤 N₂O 排放的主要影响因素及减排措施研究进展

彭世彰^{1 2} 杨士红^{1 2} 丁加丽³ 徐俊增^{1 2}

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ;
2.河海大学节水研究所 江苏 南京 210098 ;3.江苏省南通市水利局 江苏 南通 226006)

摘要 :对农田土壤 N₂O 排放的主要影响因素(包括土壤含水量、土壤 pH 值、土壤温度、土壤质地和肥料施用等) 已有农田土壤 N₂O 排放减排措施及估算模型的研究进展进行了总结分析 ,并指出了今后研究的重点和方向 (a)探究农田土壤 N₂O 排放的内在机制 (b)提高预测模型的精度 (c)提出科学合理的减排措施 .

关键词 :土壤 N₂O 排放 ;影响因素 ;减排措施 ;估算模型

中图分类号 :S275 **文献标识码 :**A **文章编号 :**1000-1980(2009)01-0001-06

随着人类活动的加剧 ,大气中温室气体的浓度不断升高 ,引起全球地表增温 ,这对人类的生存环境和社会经济发展各方面产生了重大影响 .氧化亚氮(N₂O)是一种重要的温室气体 .如果以 20 a 时间尺度来计算 ,单位质量 N₂O 对温室效应的贡献率虽仅为 5 % ,但它的增温潜势却分别是 CH₄ 和 CO₂ 的 13 倍和 296 倍 .农田土壤是大气 N₂O 的一个重要源 .据估计 ,全球目前 N₂O 的排放总量为 16.2 Tg/a ,其中农业生产引起的排放量达 3.3 Tg/a ,占总排放量的 20%(排放量以总氮计)^[1] .目前 ,有关农田土壤 N₂O 产生和排放机理以及减排措施的研究已成为土壤和大气科学领域的重要课题 ,引起了国内外学者的广泛关注 .我国作为一个农业大国 ,有着特有的耕作制度和环境条件 .长期以来 ,为了弥补农作物对氮素的要求 ,我国大部分农田主要依靠化肥的大量施用来提高农作物的产量和品质 .农田平均的化肥施用量是美国的 2 倍以上 ,农田氮素大量流失 ,引发了严重的农业环境问题 .因此 ,在我国开展农田土壤 N₂O 生成与排放的研究具有十分重要的意义 .

本文对我国农田土壤 N₂O 排放的主要影响因素、减排措施以及估算模型的研究进展进行了总结 ,并提出了今后研究的方向和需要关注的问题 .

1 农田土壤 N₂O 排放的主要影响因素

农田土壤 N₂O 的产生主要是在微生物的参与下 ,通过硝化作用和反硝化作用完成的 .在这个复杂的物理、化学和生物学过程中 ,土壤水分状况、土壤理化性质、化肥种类以及施用方式等是影响农田土壤 N₂O 排放的主要因素 .

1.1 土壤含水量对农田土壤 N₂O 排放的影响

土壤含水量影响土壤的通气状况和氧化还原状况 ,并且通过影响 NH₄⁺ -N 和 NO₃⁻ -N 在土壤中的分布及其对微生物的有效性 ,作用于土壤中的硝化作用和反硝化作用 ,从而对土壤 N₂O 的排放产生影响 .当土壤含水量较低时 ,硝化作用和反硝化作用均随土壤含水量的增大而增加 ,表现为 N₂O 的排放随土壤含水量的增大而增加 .当土壤含水量处于某一临界范围时 ,硝化作用和反硝化作用同时达到最大 ,表现为 N₂O 排放达最强 ,且随着土壤含水量的增大 ,土壤中的 O₂ 越来越少 ,硝化作用受到抑制 ,反硝化过程也逐渐向不利于产生 N₂O 的生物化学平衡态移动 ,表现为 N₂O 的排放越来越弱 .

研究表明 ,当土壤含水量处于某一临界范围时 ,N₂O 的排放最强 .这一临界范围值由于微生物种群结构、土壤物理化学性质以及田间耕作管理方式等存在地域差异 ,一般发生在土壤湿度为 90 % ~ 100 % 的田间持

收稿日期 :2007-12-29

基金项目 :全国优秀博士学位论文作者专项基金(200546) ,高等学校博士学科点专项科研基金(20060294007)

作者简介 :彭世彰(1959 —) 男 ,上海人 ,教授 ,博士 ,博士生导师 ,主要从事节水灌溉理论与农田生态效应研究 .

水率或 77% ~ 86% 的饱和含水率之间^[2]。郑循华等^[2]对太湖地区稻麦轮作农田系统的研究表明,无论从旱田过渡到水田,还是从水田过渡到旱田,土壤含水量的临界范围都为 97% ~ 100% 的田间持水率。低于该临界范围下限值时, N_2O 的排放与土壤湿度呈正相关关系,反之则呈负相关关系^[3]。降雨会改变土壤湿度,从而影响 N_2O 的生成和排放。徐文彬等^[4]对贵州旱田土壤 N_2O 释放的研究表明:暴雨过后,试验田土壤饱和含水率达到 83% 以上后, N_2O 的释放通量是整个试验过程中最低的;土壤饱和含水率降至 75% 时才出现 N_2O 的释放峰。黄国宏等^[5]对大田玉米 N_2O 的生成和排放研究也得到了上述结果:大雨过后,土壤含水量达到田间持水率并持续较长时间时会出现 N_2O 排放量的低谷。

1.2 土壤 pH 值对农田土壤 N_2O 排放的影响

土壤 pH 值是农田 N_2O 排放最复杂和最主要的影响因素之一,它直接影响着参与氮转化过程的微生物种群以及不同作用阶段的酶活性。一般认为,土壤硝化细菌进行硝化作用的最适 pH 值范围在 8.5 左右,土壤 pH < 6.0 时硝化速率显著下降, pH > 10.0 时硝化作用受阻。反硝化作用的最适 pH 值范围是 6.0 ~ 8.0。黄国宏等^[5]的研究表明, pH 值在 7.0 ~ 10.0 之间时,随着土壤 pH 值的下降, N_2O 排放呈递增趋势。Nagele 等^[6]认为反硝化过程产生的 N_2O 随着土壤 pH 值的下降而递增, Weier 等^[7]发现硝化作用中也存在这种关系。张素玲^[8]认为存在差异的原因在于,采用不同土壤进行试验时,忽略了不同土壤本身微生物区系间的差异。土壤不同,微生物的种群、数量也就不同,对 pH 的敏感性就不同。因此,不同土壤调节 pH 后, pH 与 N_2O 产生之间的关系很可能不完全一样。张素玲^[8]通过 pH 值变化对土壤中 N_2O 释放的影响研究发现,不同系列土壤中 N_2O 产生最大速率时的 pH 值范围不同:酸性土壤系列,该值位于 pH = 6.7 左右;碱性土壤系列,该值位于 pH = 5.9 左右;中性土壤系列,该值位于 pH = 5.25 左右。 N_2O 排放最低值时的 pH 对于酸、碱、中性土壤系列来说也不尽相同,分别位于 4.4、7.7 和 7.44 左右。

当温度、水分含量等其他条件不同时, pH 值对 N_2O 排放量的影响也不一样。Goodroad 等^[9]的实验室研究发现,加入 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的土壤在 30℃ 和 30% 饱和含水率的条件下培养, pH 值分别为 5.1 和 6.7 时, N_2O 的排放量比 pH 值为 4.7 时分别高 3 倍和 4 倍;但在 10 ~ 20℃ 下,水分含量为 10% ~ 20% 饱和含水率时, pH 值的影响不明显。因此,稻田土壤和旱作农田土壤的 pH 值对 N_2O 排放的影响可能有不同规律。目前,这方面的研究报道还比较少。

1.3 土壤温度对农田土壤 N_2O 排放的影响

土壤温度通过调节影响土壤中 N_2O 传输速率的物理化学参数,从而对 N_2O 产生的生物学过程产生影响。郑循华等^[10]的研究表明,温度是影响 N_2O 排放季节变化的关键因子;在土壤湿度适宜的范围内, N_2O 排放通量对温度的依赖性可用指数函数来描述。轮作周期内显著 N_2O 排放发生的频率随温度的变化呈正态分布, 67% 的排放量都集中在 15 ~ 25℃ 温度范围内。徐文彬等^[11]通过对旱田土壤 N_2O 排放的研究发现,温度是土壤 N_2O 日排放通量变化的最主要控制因素;除大豆地外,有其他作物生长和休耕时农田土壤的 N_2O 排放通量季节变化与温度之间均存在一定程度的正相关性,其中冬春季休耕地的 N_2O 排放通量与温度间存在弱指数函数关系。叶欣等^[12]的研究也表明,华北平原玉米、大豆、棉花田的 N_2O 排放随着温度的增加呈指数增长,并且 3 块农田 N_2O 通量均与 5 cm 地温呈正相关关系,达到 0.01 显著水平。谢军飞等^[13]通过对土壤温度与旱地农田 N_2O 排放的研究发现,在 10 ~ 30℃ 范围内,随着土壤表层温度的升高,麦豆轮作生态系统的 N_2O 排放通量呈现不同程度的增加,但线性相关关系较不明显。

虽然硝化作用和反硝化作用微生物活动均有其适宜的温度范围,然而, N_2O 在反应产物中的比重取决于 O_2 浓度,而不是硝化或反硝化过程的反应速率^[14]。 N_2O 排放是土壤温度、 O_2 浓度、反应底物浓度以及传输过程交互作用的结果。因此,土壤温度对 N_2O 排放的影响表现格外复杂,仍需深入研究。

1.4 土壤质地对农田土壤 N_2O 排放的影响

土壤通透性对土壤硝化作用和反硝化作用的相对强弱以及 N_2O 在土壤中的扩散速率影响较大,并通过影响土壤有机质的分解速率进而影响产 N_2O 微生物的基质供应。重质地旱作土壤的 N_2O 排放高于轻质地土壤,这主要是由重质地旱作土壤较强的保水能力引起的。徐华等^[15]的研究表明,壤质土壤排放的 N_2O 高于砂质和黏质土壤。李良谟等^[16]指出,在水稻苗期,不同土壤的 N_2O 排放强度是不同的, N_2O 排放强度最大的是红壤型水稻土,其次是潜育型水稻土,最小的是淹育型水稻土。目前,土壤质地对水田土壤 N_2O 排放的影响

研究还较少.

1.5 肥料对农田土壤 N₂O 排放的影响

氮肥的类型、施用量、施肥方式以及施肥时间都会影响农田土壤 N₂O 的排放.侯爱新等^[17]对不同种类氮肥对土壤释放 N₂O 的影响的研究表明,与施用普通碳酸氢铵和尿素相比,施用长效碳酸氢铵可以明显延后 N₂O 释放高峰期的出现时间,而且大多数情况下可以显著减少 N₂O 的释放量.一般而言,稻田深施氮肥会减少氮素损失,少量多次,分期分批施用氮肥均可减少 N₂O 的排放.对于施用有机肥和无机肥对农田产生和排放 N₂O 的影响,不同研究者的研究结果并不一致.熊正琴等^[18]的研究表明,在早稻生长季节,既施绿肥又施化肥时的 N₂O 排放量显著高于只施绿肥不施化肥、只施化肥不施绿肥或既不施绿肥也不施化肥的处理.Zheng 等^[19]的观测表明,在堆肥加尿素的田块中,N₂O 的排放量比施用碳酸氢铵的田块减少 30% 左右.曾江海等^[20]的研究表明,有机肥比尿素更能促进 N₂O 的生成与排放,施尿素和施有机肥 2 个处理,土壤排放 N₂O 分别占相应总施氮量的 0.54% 和 0.70%.秦晓波等^[21]的研究表明,有机肥和化肥对稻田 N₂O 的排放具有不同的影响.对于早稻而言,只施化肥处理的 N₂O 排放量最大;对于晚稻而言,施用化肥和有机肥处理的 N₂O 排放量最大.因此,关于有机肥与化肥处理对 N₂O 排放量的影响还有待于进一步研究.

李方敏等^[22]的研究发现,包膜型控释肥比未包膜复合肥能极显著地降低稻田 N₂O 的排放量;在施肥后的 100 d 内,控释肥的 N₂O 累积排放量仅为未包膜型复合肥料的 13.45% ~ 21.26%,是尿素处理的 71.17% ~ 112.47%.复合肥处理的 N₂O 排放主要集中在施肥后的 1 ~ 25 d 和水稻晒田期间,控释肥在此时期的排放量显著降低.

1.6 其他因素的影响

作物类型对农田 N₂O 排放的影响较大.熊正琴等^[23]的研究表明,豆科作物 N₂O 的排放量显著高于非豆科作物,豆科作物是农田 N₂O 排放的重要来源之一.邹建文等^[24]的研究表明:与常规灌溉(淹水和烤田相结合)相比,水稻生长季持续淹水处理促进了后季麦田 N₂O 的排放,水稻生长季秸秆施用可减少后季麦田 N₂O 的排放.另外,土壤的耕作制度、光照等对农田 N₂O 的排放都会有一定的影响.

2 农田土壤 N₂O 排放的减排措施

为了用有限的农业土地资源生产出更多的粮食,就需要大量地施用氮肥,N₂O 的排放量也会随之大幅上升.因此,深入研究农田土壤 N₂O 的排放机理并提出切实可行的减排措施,对控制温室气体、维护生态平衡、改善人类生存环境具有重要意义.目前,主要采用的减排方式有:提高氮肥利用率、施用长效氮肥和控释化肥、施用生物抑制剂以及改进水分管理措施等.

2.1 提高氮肥利用率

目前,我国的氮肥利用率在 20% ~ 50% 之间,若将氮肥利用率从 20% ~ 30% 提高到 30% ~ 40%,则可相应地降低 10% 的 N₂O 排放^[25].提高氮肥利用率的措施包括合理的养分配比、改表施为深施、有机肥与化肥混施等.

2.2 施用长效氮肥和控释化肥

碳酸氢铵和尿素是我国农业的主体肥料,但它们的肥效期短,挥发损失量大,氮素利用率低.黄国宏等^[26]对玉米田 N₂O 排放的研究表明,施用长效碳酸氢铵和缓释尿素能明显减少 N₂O 排放;长效碳酸氢铵与碳酸氢铵和尿素相比,能减少 76% 左右的 N₂O 排放,缓释尿素能减少 58% 左右的 N₂O 排放.梁巍等^[27]的研究表明,长效尿素的施用使黑土稻田 N₂O 排放量减少了 61%.稻田施用控释肥与施用复合肥相比,可减少 N₂O 排放 80% 左右^[22].值得注意的是,虽然长效氮肥和控释肥能明显减少农田 N₂O 的排放,但其对农田 CH₄ 排放的影响仍需要关注.

2.3 施用生物抑制剂

陈利军等^[28-29]的研究表明,脲酶抑制剂能明显减少农田 N₂O 的排放量.然而,生物抑制剂并不一定能提高氮素的利用率和作物产量.因此,关于硝化抑制剂使用的可行性还有待于进一步研究.

2.4 改进水分管理措施

旱作农田的大量、少次浇水均可减少 N₂O 的排放.水稻是我国主要粮食作物之一,随着水资源紧缺问题

的日益突出,在我国已经出现了多种稻田节水灌溉方式,如水稻控制灌溉技术、水稻旱育稀植技术、水稻“薄浅晒晒”灌水技术等。目前,普遍认为烤田可以减少稻田 CH_4 的排放,但同时能增加 N_2O 的排放。因二者的增温潜势不同,所以水稻节水灌溉技术作为 CH_4 的减排措施是否合理,还必须通过进一步的定量试验来验证。蒋静艳等^[30]的研究表明,对于施加大量有机质的稻田(如 4.5 t/hm^2 秸秆还田),烤田的 GWP(全球增温潜势)只占淹水处理处理的 60% 左右。岳进等^[31]的研究发现,在同样施肥水平条件下,间歇灌溉与长期淹灌相比, CH_4 排放明显减少而 N_2O 略有增加,其相对综合温室效应大大减弱且水稻产量未受影响。因此,间歇灌溉可作为减少稻田温室气体排放的水分管理措施。

3 农田土壤 N_2O 排放量的计算

为研究温室气体对未来环境、经济的影响,需要对全球温室气体的排放量进行预测和估算。宏观尺度土壤 N_2O 排放量的估算主要采用 2 种方法:利用生态系统类型和 N_2O 排放通量间的经验关系进行推算;根据 N_2O 排放过程机理模型进行推算。

3.1 利用生态系统类型和 N_2O 排放通量之间关系的经验公式进行推算

利用生态系统类型和 N_2O 排放通量之间关系的经验公式进行推算的方法利用了各类土壤或生态系统间的自然特征差异。若将全球土壤划分成若干个生态系统类型,并假设每个生态系统中典型地区的 N_2O 排放量代表了该生态系统的平均 N_2O 排放速率,就可以根据典型地区的 N_2O 排放通量与其所代表生态系统的土壤面积的乘积来计算全球各类土壤的 N_2O 排放量^[32-33]。该估算方法的优点是简单易行、可以粗略评估出各类土壤或区域在 N_2O 排放上的相对重要性、能判别影响 N_2O 排放的关键因素,缺点是不能详尽反映 N_2O 排放过程中复杂的时空变化及对未来环境变化和人类活动的影响。

3.2 根据排放过程机理模型进行推算

排放过程机理模型是根据土壤 N_2O 生成、消耗和迁移过程的机理以及 N_2O 生成、消耗和迁移过程与控制因子间的定量关系而建立的模拟模型^[34]。目前,已建立的模型有 ENTURY-NGAS^[35], EXPERT-N^[36], DNDC^[37] 和 NASA CASA^[38] 等。其中,李长生^[37]建立的 DNDC(decomposition and denitrification)模型应用最为广泛。DNDC 模型由 2 部分组成,第 1 部分包含土壤气候、植物生长和有机质分解的子模型,第 2 部分包含硝化、脱氮和发酵过程的子模型。由于能对土壤中的有机质分解、硝化和反硝化作用、作物吸收、 NH_4^+ 交换等过程进行详尽模拟,而且要求输入的参数也比较简单, DNDC 模型获得了较广泛的应用,如已经成功推算了美国农业土壤的 N_2O 排放量。目前,该模型在我国的应用也较多。总的来说,不论是旱田还是水田,模拟值与实测值都比较吻合。勾继等^[39]的研究表明,利用 DNDC 模型能模拟出轮作周期内 N_2O 的主要排放峰值和排放趋势,但模拟值普遍小于实测值。谢军飞等^[40]的模拟对比分析结果表明, DNDC77 模型能较好地模拟田间大豆生长期 N_2O 排放通量、气温和地表温度的变化以及 N_2O 排放对每日降雨的响应,但该模型低估了干旱期和非农业活动期间农田的 N_2O 排放通量。

随着人们对土壤 N_2O 排放机理认识的不断深入,模型的精度和功能将会不断提高。无论采用哪种方法来描述大区域土壤 N_2O 的排放情况,都需要利用实测的田间数据对模型进行检验和修正。目前,箱技术和微气象学技术是最常用的土壤 N_2O 排放通量测量方法。然而,箱技术只能用于点位土壤 N_2O 排放通量的测量。微气象学技术虽能测量出较大区域的土壤 N_2O 排放通量,但需要有高灵敏度的传感器,且不能反映排放通量与环境因子的关系。因此, N_2O 排放估算模型的建立、验证和修正等还有待进一步研究。

4 有待进一步研究的问题

a. 农田土壤 N_2O 排放与其影响因素间的关系。农田土壤 N_2O 排放受很多因素的影响,是一个极其复杂的过程。虽然前人对该问题进行了很多研究,但还有一些影响因素与农田 N_2O 排放的关系不是很明确。只有了解农田土壤 N_2O 排放的内在机制以及硝化和反硝化过程,才能对 N_2O 生成的内部因素进行调控,并提出切实可行的减排措施。

b. 节水灌溉条件下农田土壤 N_2O 的排放规律。随着各种节水灌溉技术的大面积推广,节水灌溉条件下农田土壤 N_2O 排放规律及其机理的研究显得越来越重要。目前,稻田土壤 N_2O 排放的研究大多以淹水灌溉、

常规灌溉、间歇灌溉、常湿灌溉等处理为基础,这些灌溉处理的设计与水稻生产中实际应用的灌溉模式有较大差异,严格意义上的节水灌溉条件下(如‘薄露’和‘控制灌溉’等)稻田 N₂O 排放以及整体温室效应研究还较少。

c. 温室气体估算模型. 由于区域间气候和土壤差异显著,耕作方式亦不相同,而现有农田土壤 N₂O 排放通量的观测只建立在少数观测站点的基础上,很难对大区域农田土壤 N₂O 排放情况进行较为准确的估算,因此建立实用性强和预测精度高的预测模型,用以模拟大区域农田土壤 N₂O 排放量,从而预测 N₂O 排放对未来环境的影响是进一步研究的重点。

参考文献：

[1] 王效科,李长生. 中国农业土壤 N₂O 排放量估算[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4) :483-488.

[2] 郑循华,王明星,王跃思. 华东稻麦轮作生态系统的 N₂O 排放研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(5) :495-496.

[3] 郑循华,王明星,王跃思,等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N₂O 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3) :273-279.

[4] 徐文彬,刘广深,刘维屏. 降雨和土壤湿度对贵州旱田土壤 N₂O 释放的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(1) :67-70.

[5] 黄国宏,陈冠雄. 土壤含水量与 N₂O 产生途径研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1) :53-56.

[6] NAGELE W, CONRAD R. Influence of pH on the release of NO and N₂O from fertilized and unfertilized soil[J]. Biol Fertil Soils, 1990, 10(1) :49-58.

[7] WEIER K L, GILLIAM J W. Effect of acidity on nitrogen mineralization and nitrification in Atlantic coastal plain soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 50(5) :1210-1214.

[8] 张素玲. pH 变化对土壤中 N₂O 释放的影响[D]. 扬州：扬州大学, 2001.

[9] GOODROAD L L, KEENEY D R. Nitrous oxide production in aerobic soils under varying pH, temperature and water content[J]. Soil Bio Biochem, 1984, 16 :39-43.

[10] 郑循华,王明星,王跃思,等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5) :1-5.

[11] 徐文彬,刘维屏,刘广深. 温度对旱田土壤 N₂O 排放的影响研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1) :1-8.

[12] 叶欣,李俊,王迎红,等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6) :1186-1191.

[13] 谢军飞,李玉娥. 土壤温度对旱地农田 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 2005, 26(1) :7-10.

[14] ANDERSON I C, LEVINE I S. Relative rates of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifiers, denitrifiers, and nitrate respirers[J]. Appl Environ Microbiol, 1986, 51 :938-945.

[15] 徐华,邢光熹,蔡祖聪,等. 土壤质地对小麦和棉花田 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(1) :1-3.

[16] 李良谟,伍期途. 原位条件下不同土壤中 N₂O 的通量[J]. 土壤, 1991, 23(1) :24-27.

[17] 侯爱新,陈冠雄. 不同种类氮肥对土壤释放 N₂O 的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(2) :176-180.

[18] 熊正琴,邢光熹,鹤田治雄,等. 豆科绿肥和化肥氮对双季稻田氧化亚氮排放贡献的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(5) :703-710.

[19] ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Characters of greenhouse gas(CH₄, N₂O, NO) emission from croplands of southeast China[J]. World Resource Review, 1999, 11(2) :229-246.

[20] 曾江海,王智平,张玉铭,等. 小麦-玉米轮作期土壤排放 N₂O 通量及总量估算[J]. 环境科学, 1995, 16(1) :32-35.

[21] 秦晓波,李玉娥,刘克樱,等. 不同施肥处理对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 中国农业气象, 2006, 27(4) :273-276.

[22] 李方敏,樊小林,刘芳,等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2) :2170-2174.

[23] 熊正琴,邢光熹,鹤田治雄. 种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9) :1104-1108.

[24] 邹建文,黄耀,宗良纲,等. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(4) :409-414.

[25] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5) :722-732.

[26] 黄国宏,陈冠雄,张志明,等. 玉米地 N₂O 排放及减排措施研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(4) :344-349.

[27] 梁巍,张颖,岳进,等. 长效氮肥施用对黑土水旱田 CH₄ 与 N₂O 排放的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3) :44-48.

[28] 陈利军,史奕,李荣华,等. 脲酶抑制剂和硝化抑制剂的协同作用对尿素氮转化和 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4) :368-372.

[29] 周礼恺,徐星恺,陈利军,等. 氢醌和双氰胺对种稻土壤 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2) :189-192.

[30] 蒋静艳,黄耀,宗良纲. 水分管理 with 秸秆施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5) :552-556.

- [31] 岳进,梁巍,吴杰,等.黑土稻田 CH_4 和 N_2O 排放及减排措施研究[J].应用生态学报,2003,14(11):2015-2018.
- [32] EICHNER M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: summary of available data[J].J of Environ Quality,1990,19:272-280.
- [33] KELLER M,KAPLAN W A,WOFSY S C. Emissions of N_2O , CH_4 and CO_2 from tropical forest soils[J]. J Geophys Res,1986,91:11791-11802.
- [34] 徐文彬.浅谈推算和预测宏观尺度土壤 N_2O 释放量的方法[J].土壤通报,2000,31(2):91-95.
- [35] PARTON W J,OJIMA D S,COLE C V et al. A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management[J]. Soil Sci Soc Am,1994,39:147-167.
- [36] ENGLE T H,PRIESACK E. Expert N: a building block system of nitrogen models as a resource for advice, research, water management and policy[M]/EIJSSACKERS H J P,HAMERS T. Integrated soil and sediment research: a basis of proper production. Boston: Kluwer Academic Publishers,1993:503-507.
- [37] 李长生.生物地球化学的概念与方法-DNDC 模型的发展[J].第四纪研究,2001,21(2):89-99.
- [38] POTTER C S,MATON P A,TOUSE K,et al. Process modeling of controls on nitrogen trace gas emissions from soil world-wide[J]. J Geophys Res,1996,101:1361-1367.
- [39] 勾继,郑循华,王明星,等.华东地区稻麦轮作农田生态系统 N_2O 排放的模拟研究[J].大气科学,2004,24(6):835-842.
- [40] 谢军飞,李玉娥. DNDC 模型对北京旱地农田 N_2O 排放的模拟对比分析[J].农业环境科学学报,2004,23(4):691-695.

Key influencing factors and mitigation measures of nitrous oxide emission from agricultural soil

PENG Shi-zhang^{1,2}, YANG Shi-hong^{1,2}, DING Jia-li³, XU Jun-zeng^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Institute of Water-Saving Irrigation, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Nantong Water Resources Bureau of Jiangsu Province, Nantong 226006, China)

Abstract: The new research progress of nitrous oxide emission from agricultural soil was summarized and analyzed, including the key influencing factors (soil moisture, pH value, soil temperature, soil texture and fertilization), mitigation measures and models. The key points and orientation of future researches were put forward as follows: to discover the inherent mechanism of nitrous oxide emission, to improve the accuracy of models, and to propose the scientific and reasonable mitigation measures.

Key words: soil; nitrous oxide emission; influencing factor; mitigation measure; estimation model